

절인반경차이에 따른 연질재료의 정밀가공 특성 연구

유기현*, 권용기**

A Study on the Precision Cutting Characteristics for Different Cutting Edge Radii in Ductile Material

Ki-hyun Yu*, Yong-ki Kwon**

Abstract

This paper deals with the precision cutting characteristics of mono-crystal diamonds, poly-crystal diamonds and tungsten carbide tool on ductile material. The cutting tests were carried out under various uncut chip areas and 20 μ m depth of engagement. The machinability in precision machining was discussed from the viewpoints of the normal cutting forces and the surface roughness of the workpiece.

As the feed rate decreases, the normal force difference for cutting edge radii appears to be large. In various cutting edge radii, the surface roughness difference when cut the copper which is ductile material than the aluminium alloy is large. As the same cutting condition, the hardness value on cut surface with the diamond tool appears to be smaller than that of the tungsten carbide tool.

Key Words : Precision Cutting(정밀가공), Ductile material(연질금속), Mono Crystal Diamond(MCD, 단결정 다이아몬드), Poly Crystal Diamond(PCD, 다결정다이아몬드), Tungsten carbide(WC, 초경공구), Cutting edge radius(절인반경)

1. 서론

첨단산업은 국가적 기술력의 핵심 부분을 차지하고 있으며 이러한 기술력의 근간을 이루고 있는 부분중의 하나가 정밀가공이다. 이는 계속적인 기계산업의 발전과 더불어 컴퓨터, 우주 항공, 통신분야, 자동차 등 첨단산업 분야에서 괄목할 만한 성장을 보이고 있다.

정밀가공은 기계 부품의 형상, 치수, 표면 등에서 요구되는 정밀도를 향상시킴으로서 조립후의 기계 효율을 높여 상품가치를 향상시킬 수 있다. 이와 같이 정밀가공을 함으로서 높은 정밀도의 부품을 얻을 수 있으며 오래 전부터 연삭가공이 정밀부품을 가공하는데 이용되어 왔다.

현재에도 연삭가공이 정밀가공으로서 차지하는 부분은 넓다. 그러나 중요한 부품의 연삭가공은 대부분이 수작업

* 전북대학교 기계공학부 강사
** 전주공업대학 기계과 교수

에 의존함으로써 금속제거율(metal-removal rate)이 낮아 제품의 생산성 향상에 문제가 대두되며 또한 가공 형상 및 정밀도 부분에서 재현성이 결여되는 단점을 안고 있다.⁽¹⁾ 특히 연질금속과 같이 연성이 풍부한 금속과 비금속은 연삭가공 보다는 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭가공 함으로서 제품의 생산성을 향상시킬 수 있다. 또한 형상정밀도 및 치수정밀도를 향상시킬 수 있으며 가공 변질층을 작게하고 표면 반사율도 높일 수 있다.^(2,3) 이에 따라 다이아몬드 공구를 이용한 정밀절삭에 많은 관심을 갖게되어 여러 연구기관에서 계속적으로 이에 대한 논문이 배출되고 있으며 끊임없는 연구가 지속되고 있다.^(4,5,6)

이 분야에서의 연구는 미국의 Union Carbide사가 다이아몬드 공구를 이용한 절삭가공 기술을 계획, 프랑스와 협동으로 높은 정밀도의 공작기계를 개발하고 반구체를 절삭하여 MTRD에 발표한 것이 최초이다. 계속하여 미국의 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)에서 oil shower방식의 높은 정밀도 절삭가공장치 개발되고, 유럽에서도 Philips사가 정압베어링을 이용하여 다이아몬드 공구를 이용한 선반을 제작하여 발표하였다. 또한 우리 나라에서도 학교 및 연구기관에서 90년대부터 이 분야에 관심을 가지고 연구^(7,8) 중이며 많은 논문이 배출되고 있다.

정밀절삭가공은 여러 가지 복합적인 요인에 의하여 영향을 받으며 특히 공작기계, 공구, 피삭재, 가공조건 및 주위환경 등을 연구함으로써 그 특성을 이해 할 수 있다. 절삭공구의 절인 반경은 정밀절삭에서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. Asai등은 미소 절인반경에 대해 연구하였고⁽⁹⁾ Luo등은 카바이드 입자의 크기를 1 μ m로 하여 공구를 제작하였으나 다이아몬드 공구에 의한 표면거칠기에는 미치지 못하였다. Ikawa는 천연다이아몬드의 절인 반경의 도달한계는 2nm라고 보고⁽¹⁰⁾하는 등 절삭공구의 절인 반경에도 많은 연구가 이루어졌다.

본 실험에서는 절삭공구의 절인 반경 차이에 따른 정밀 절삭 가공의 안정적인 특성을 파악하기 위해 각각 절인 반경이 다른 천연다이아몬드 공구, 인조다이아몬드 공구 및 초경공구를 이용하여 연질금속인 알루미늄합금(Al 2024) 및 순수구리(Cu(99.99%))를 피삭재로 이용, 같은 절삭조건 하에서 절삭가공 하였다. 절삭도중 발생하는 절삭력, 절삭 후 가공면의 표면거칠기 및 경도를 측정하여 각각의 절삭조건에 따라 변화되는 과정을 그래프화 하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 CNC밀링을 이용하여 평면 절삭실험을 행하였으며 사용된 실험장치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental apparatus

CNC milling	SYSTEM 100L
Tool dynamometer	KISTLER 9257A
Charge amplifier	KISTLER 5001
A/D converter	FPGA ASIC controller
586 computer	Pentium process
Surface roughness tester	Mitutoyo SurfTest-301
Hardness tester	Digital Micro Hardness Tester (MXT-CX7)
Metal microscope	OLYMPUS MF-TR
Dialgauge	1/1000mm

Fig. 1에서는 본 실험에서 사용된 실험장치 및 설치를 보여주고 있다.

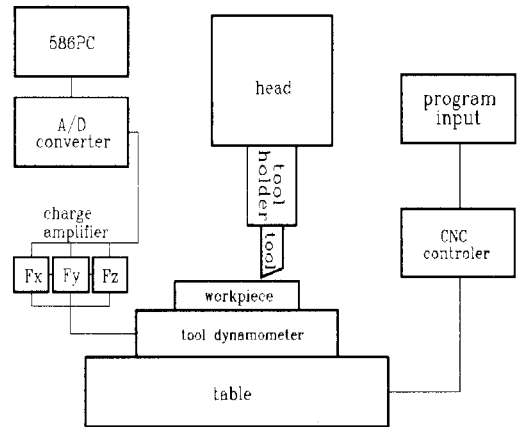


Fig. 1 Experimental device setup

2.2 절삭공구 및 피삭재

본 실험에서는 절인 반경을 서로 다르게 하기 위하여 천연다이아몬드(MCD)공구, 인조다이아몬드(PCD)공구, 초경공구를 이용하였으며 피삭재로는 각종 구조재에

사용되고 경량화를 요구하는 항공 및 자동차부품 재료에 이용되고 있는 알루미늄합금(Al 2024)과 연질재료인 순수 구리(순도 99.99%)를 선정하여 평면 절삭실험을 행하였다. Table 2와 Table 3에서는 각각 알루미늄(Al 2024)합금의 조성성분과 실험에 사용된 공구의 기하학을 보여주고 있다.

Table 2 Chemical compositions of Al alloy (2024)

Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Al	Heat treatment
3.8 ~ 4.9	1.2 ~ 1.8	0.50 max	0.50 max	0.3 ~ 0.9	0.15 max	0.10 max	rest	T4

Table 3 Geometry of Tool

Tool	rake angle	relief angle	nose radius
MCD	0°	5°	0.8mm
PCD	0°	5°	0.8mm
WC	0°	5°	0.8mm

피삭재를 평면절삭이 가능하도록 지그에 장착하고 공구 동력계위에 고정하여 밀링머신의 테이블에 고정하였다. 피삭재를 고정시킨 후 1mm의 측정범위를 갖는 다이얼 게이지를 이용하여 가공물의 절삭 시작점과 종료점의 높이차를 측정하였다. 밀링헤드에 공구를 장착하여 Table 4에 있는 각각의 절삭조건별로 프로그램에 입력한 후 컴퓨터를 통하여 절삭조건을 CNC밀링에 보내어 평면절삭을 수행하였다. 절삭이 수행되는 도중 절삭력은 공구동력계에 의해 미세한 신호로 나타나고 이것은 다시 증폭기를 지나 증폭된 후 A/D컨버터를 거쳐 다른 컴퓨터에 저장되고 프로그램에 의하여 모니터를 통해 절삭력을 확인할 수 있

Table 4 Cutting conditions

Cutting speed (m/min)	30
Feed rate (μm/stroke)	10, 20, 30
Depth of engagement (μm)	20

게 하였다. 절삭이 끝난 후 가공표면은 촉침식 표면조도계를 이용하여 컷오프 0.8mm, 트레버싱 길이 2.4mm의 조건으로 거칠기를 측정하고 경도측정기를 이용하여 가공면의 표면경도를 측정하여 기록하였다. 이상의 방법으로 얻은 데이터를 종합하여 그래프를 그리고 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

연질재료인 알루미늄 합금(Al 2024) 및 순수구리(Cu)를 다이아몬드 공구를 이용하여 정밀절삭실험을 하면서 절삭성을 검토하였다. 특성 평가를 하기 위해 물림깊이는 고정시킨 상태에서 이송변화에 따른 절삭력과 표면거칠기 및 가공후 표면경도가 측정되었다. 각각의 데이터는 분석 결과로서 다음의 그래프로 나타내었다.

Fig. 2는 알루미늄합금을 절인 반경이 각각 다른 천연다이아몬드 공구, 인조다이아몬드 공구 및 초경공구를 이용하여 이송변화에 따른 주분력(Ft)의 변화를 보여주고 있다. 이송이 증가 할수록 uncut chip thickness가 증가하여 주분력도 증가하고 있는 일반적인 경향을 보여주고 있다.

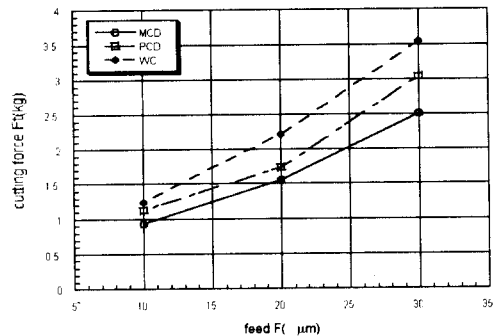


Fig. 2 Cutting force versus feed (Al 2024)

Fig. 3은 위와 같은 조건하에서 절삭력의 배분력(Fn) 성분의 변화를 보여주고 있다. 이송이 커질수록 절삭력이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 절인 반경에 따른 절삭력의 변화폭은 이송이 작은 영역에서 더 크게 나타나고 있으며, 특히 이송이 작은 영역에서는 절인 반경이 상대적으로 큰 초경공구의 경우에는 주분력보다 배분력이 크게 나타나는 현상이 관찰되고 있다.

이러한 원인은 이송이 감소하면 uncut chip thickness가 작아지고 따라서 절인 반경이 클수록 전체 절삭

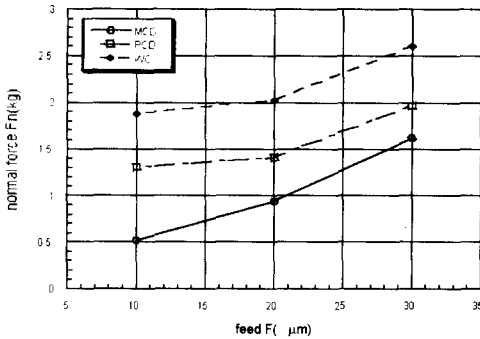


Fig. 3 Normal force versus feed (Al 2024)

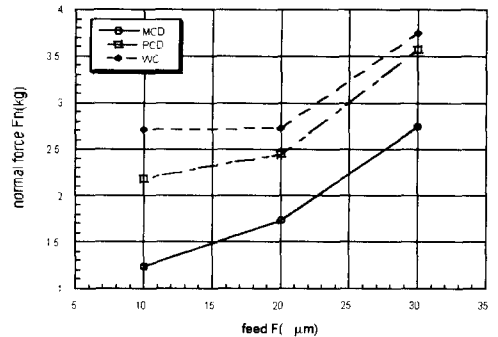


Fig. 5 Normal force versus feed (Cu)

력 중 압괴력이 차지하는 비율이 크게 나타나기 때문에 절삭력의 배분력 성분이 크게 나타나는 것으로 파악된다.

Fig. 4는 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같은 절삭조건으로 순수구리(Cu 99.9%)를 정밀절삭한 후 주분력 성분과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. Fig.2에서 나타난 경향을 보면 알루미늄보다 절삭력이 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 재료의 특성에 기인된다고 판단된다.

Fig. 5는 위와 같은 절삭조건 하에서 피삭재로 순수구리를 이용하여 정밀절삭 한 후 배분력의 변화특성을 그래프로 나타내었다. 이송감소에 따라 uncut chip thickness가 작아짐으로서 절인반경이 큰 공구일수록 배분력이 크게 나타나고 있어 Fig. 3에서와 같은 경향을 보인다. 절인 반경에 따른 배분력의 변화폭도 더 크게 보여지고 있다. 또한 인조다이아몬드 공구의 경우에서도 알루미늄합금의 경우보다 순수구리의 절삭이 주분력보다 배분력이 더 크게 나타나고 있다. 이는 연질재료의 경우 이송이 감소될수

록 정상절삭이 이루어지기 위해서는 공구절인 반경이 작은 천연다이아몬드공구가 요구되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 위와 같은 절삭조건하에서 알루미늄합금의 가공 후 표면거칠기(Rmax)를 측정하여 나타낸 그래프이다. 이송이 10μm일 경우보다 20μm인 경우 표면거칠기가 양호하게 나타났으며 그 이상으로 이송이 증가하면 표면거칠기가 증가하였다. 이송이 10μm에서 20μm의 범위에서 절인반경이 가장작은 천연다이아몬드 공구의 경우 표면거칠기 차이가 가장 작게 보여지고 있으며 절인반경이 큰 초경공구의 경우 표면거칠기 차이가 크게 나타나고 있다. 이러한 원인은 절인반경이 커질수록 절삭중 절인에 의해 피삭재의 눌림현상인 rubbing 현상이 심해져 표면거칠기의 악화 요인으로 작용된 것으로 판단된다. 절인 반경이 커도 절인의 조도가 좋으면 정밀절삭에 더욱 유리할 수도 있으나 초경공구의 경우 절인 반경이 크고 절인의 거칠기가 일정치 않기 때문에 정밀절삭에는 부적합함을 조도를 통하여 간접적으로 확인할 수 있었다.

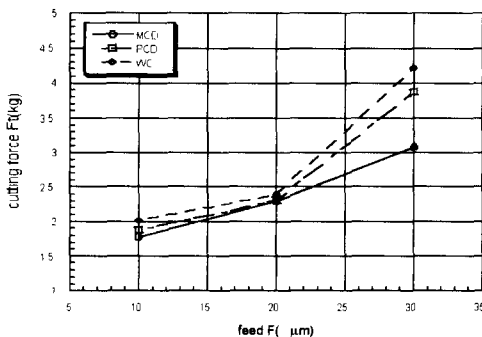


Fig. 4 Cutting force versus feed (Cu)

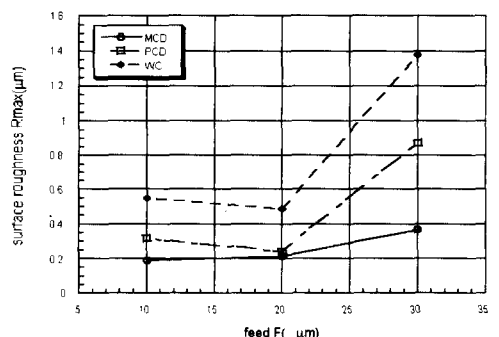


Fig. 6 Surface roughness Rmax versus feed (Al 2024)

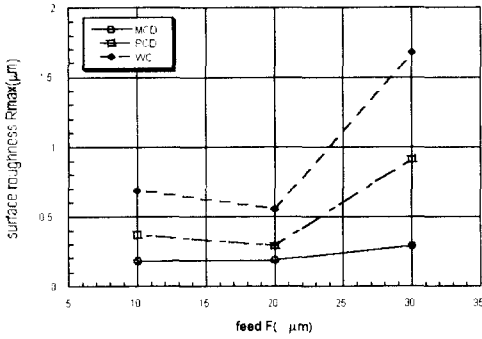


Fig. 7 Surface roughness Rmax versus feed (Cu)

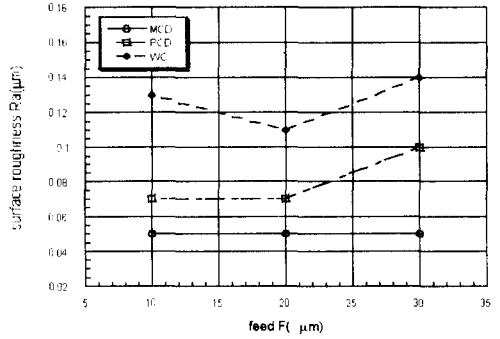


Fig. 9 Surface roughness Ra versus feed (Cu)

Fig. 7은 같은 절삭조건 하에서 순수구리의 정밀가공 후 최대높이 표면거칠기(Rmax)를 측정하여 나타낸 그래프이다. Fig. 6에서와 같은 경향을 보이고 있으며, 알루미늄합금 가공보다도 절인 반경에 따른 표면거칠기 차이는 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

여기에서도 같은 절삭조건 하에서 초경공구의 경우가 가장 큰 표면거칠기 값을 나타내고 있다. 이송이 작아질수록 rubbing 현상이 심해지고 또한 초경공구의 경우에는 다이아몬드 공구에 비해 상대적으로 절인 반경이 크고 절인이 거칠기 때문에 가공물의 표면거칠기 값이 크게 나타나는 원인으로 판단된다. 이러한 현상은 피삭재 재질에 따라 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며 본 실험에서도 알 수 있듯이 상대적으로 연성이 큰 순수구리의 경우가 절인 반경에 따른 가공물 표면거칠기 차이가 크게 보여졌다.

Fig. 8과 Fig. 9는 같은 절삭조건 하에서 다이아몬드 공구와 초경공구를 이용하여 알루미늄합금과 순수구리를 절삭가공 후 각각에 대한 공작물의 중심선평균 표면거칠

기(Ra)를 측정하여 나타낸 그래프이다. 여기에서도 역시 알루미늄합금 가공에서 보다 순수구리의 경우가 절인 반경에 따른 표면거칠기 차이가 크게 보여지고 있다. Fig. 6, 7에서의 최대높이 표면거칠기 보다 절대값은 작게 보여지고 있고, 거의 같은 경향을 보이고 있으며 역시 이송이 20μm 부근에서 양호한 값을 보이고 있다.

Fig. 10은 각각의 절삭조건하에서 알루미늄 합금의 가공이 끝난 후 가공물표면의 경도를 측정하여 그래프로 나타낸 그림이다. 공구의 절인 반경차이에 따른 표면경도 차이가 보여지고 있으며, 절인 반경이 상대적으로 큰 초경공구에 의해 절삭되어진 표면이 가장 큰 경도 값을 나타내고 있다.

이러한 원인 역시 절인 반경이 큰 공구에서 피삭재의 표면이 절삭되지 않고 일부는 절인의 밑으로 눌러지는 rubbing 현상이 발생되어 표면경도를 높이는 효과를 가져온 것으로 판단되며, 이에 따라 변질층의 깊이도 깊어지리라 생각된다. 따라서 정밀절삭에서 중요한 표면특성 중의 하나인 변질층 깊이를 줄이는 측면에서도 절인 반경

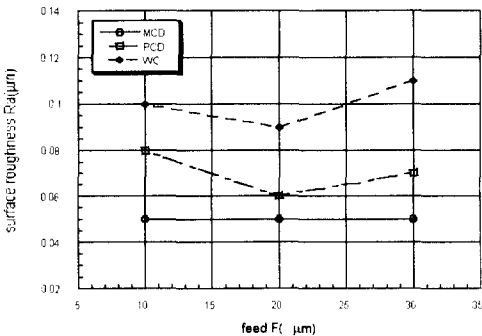


Fig. 8 Surface roughness Ra versus feed (Al 2024)

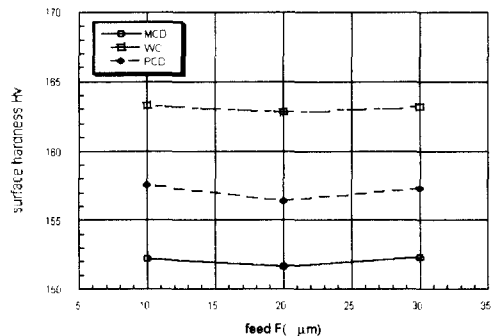


Fig. 10 Surface hardness Hv versus feed (Al 2024)

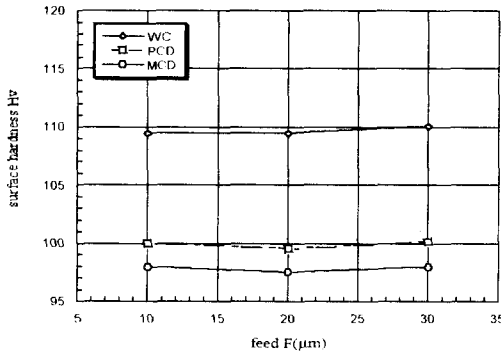


Fig. 11 Surface hardness Hv versus feed (Cu)

이 작은 다이아몬드 공구가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 11은 순수구리를 각각의 절삭조건 하에서 가공한 후 가공면의 경도를 측정하여 나타낸 그림이다. 절인 반경이 작은 다이아몬드 공구로 가공한 면의 표면경도가 가장 작게 나타남을 알 수 있으며 알루미늄 가공면의 경도 값보다 작은 값을 보이고 있으며 경향은 거의 같게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

알루미늄합금(Al 2024)과 순수구리(Cu)와 같은 연질 금속을 각각 천연 다이아몬드 공구와 인조 다이아몬드 공구 및 초경공구를 이용하여 정밀절삭 실험을 행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정밀절삭에서 uncut chip thickness가 작은 영역에서 공구의 절인반경 차이에 따른 배분력의 차이가 uncut chip thickness가 큰 영역에서의 배분력의 차이 보다 크게 나타났다.
- (2) 절인반경 차이에 따른 가공물 표면 거칠기 차이는 Al보다 상대적으로 연성이 큰 Cu의 경우에서 크게 나타나고 있다.
- (3) 공구 및 절삭조건에 따른 경도차이는 크게 나타나지 않았으나 절인 반경이 큰 공구일수록 경도층이 크게 나타남을 경도를 측정하여 간접적으로 예측할 수 있다.
- (4) 위 결과로부터 알 수 있듯이 연성이 큰 재질일수록 uncut chip thickness가 작은 절삭 조건하에서는 가공에 필요한 적절한 공구를 선택해 주어야 할 필요성이 있으며, 현재로는 천연다이아몬드 공구가 정밀절삭에는 가장 우수한 공구로 판단되고 있다.

참고 문헌

- (1) D.K.Bowen, M. Wormington ; Measurement of Surface roughnesses and Topography at Nanometer Levels by Diffuse X-Ray Scat -tering, Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp.497~500, 1994.
- (2) H.Endo, H. Senda, S.Yasuba, E.Marui ; Ultra-Precision Machining of Oxygen-Free Copper and Aluminium, Proceedings of the 7th IPE, Kobe Japan, pp.813~824, May 1993.
- (3) N. Ikawa, S. Shimade, H. Tanaka; Minimum Thickness of Cut in Microma-chining, Nanotechnology Vol.3 No.1, pp.6~9, Jan. 1992.
- (4) T.Enomoto, Y.Tani, H.Sato, Y.Kamimura; Single-Point Machining technology of a Supersmooth Surface Using a Flying Tool, Nanotechnology Vol.3 No.1, pp.1~5, Jan. 1992.
- (5) D.A.Lucca, Y.W.Seo; Aspects of Surface Generation in Orthogonal Ultraprecision Machining, Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp.43~46, 1994.
- (6) M.Sato, T.Yamazaki, Y.Shimizu, T.Takab -ayashi; A Study on the microcutting of Aluminium Single Crystals, JSME inter-national Journal Series III , Vol.34, No.4, pp.540~545, 1991.
- (7) 서남섭; 金屬切削理論, pp.401~421, 1999.
- (8) 유기현, 정진용, 권용기, 서남섭; "직선날 다이아몬드 공구에 의한 Al합금의 정밀가공특성 연구" 한국정밀공학회지, 제14권 2호, pp.113~119, 1997
- (9) S. Asai, Y. Taguchi, K. Horio, T. Kasai; Measuring the Very Small Cutting-Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors, Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp.85~88, 1990.
- (10) N. Ikawa, R. Donaldson, R. Komanduri, W. Archen; Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future, Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 2, pp.587~594, 1991.